

舰船 RCS 整形设计中的电磁分析

宋东安 邢芳 温定娥 张崎

电磁兼容性国防科技重点实验室,湖北 武汉 430064

摘要:减小舰船雷达散射截面(RCS)需要对舰船进行整形设计。本文从分析舰船典型结构——金属板的 RCS 与雷达波的入射角、频率及几何尺寸的关系出发,采用物理光学法导出了金属平板 RCS 与倾斜角的理论公式,确定了在单频点或多频点对平板进行雷达隐身设计的最佳倾斜角,通过具体实例说明了在舰船整形设计时,采用本文给出的计算公式可以对舰船的 RCS 和舱室容积进行折衷设计。结论对舰船雷达隐身设计具有指导意义。
关键词:金属板散射;舰船 RCS;整形设计

中图分类号:TN03

文献标志码:A

文章编号:1673-3185(2009)03-52-04

The Electromagnetic Analysis in Ship RCS Plastics Design

Song Dong-an Xing Fang Wen Ding-e Zhang Qi

The National Key Laboratory of Electromagnetic Compatibility, Wuhan 430064, China

Abstract: The radar cross-section(RCS) reduction needs applying plastics design to ship. In this paper, setting out from typical structures—metal plate, and discussing the relation of RCS with incident angle, frequency of radar wave, and geometry of metal plate, the formula, which characterizes the RCS of the plate with inclined angle, has been derived by physical optics theory. Through the formula, the optimal inclined angle can be determined at single frequency and multiple frequencies. Also, an example is presented to illustrate how to make a compromised design according to formulas considering stealthy of the ship and volume of the cabin. The results are significant to the stealthy design of ship.

Key words: metal plate scattering; ship RCS; plastics design

1 引言

舰船雷达隐身是舰船全隐身技术中的重要一环。它是以降低舰船被敌方雷达或电磁探测设备发现为目的的一种防御技术。目前,该技术已普遍应用于舰船总体设计中,并作为舰船的一项重要战术、技术指标。由于舰船是一个外形复杂的电大尺寸的结构物,所以其雷达隐身设计较之飞机和其它目标而言要复杂和困难得多。但是,人们针对舰船的结构特点,在不断的实践中总结出了一些舰船雷达隐身设计方法和措施。通过采取这些措施,显著地降低了舰船的雷达信号特征值——雷达截面积(RCS),使舰船逐渐向隐身化发展。通过对舰船外形进行整形而减小其 RCS 目前是舰船

雷达隐身设计中主要采取的一种技术^[1,2]。该技术不仅适应的频段较宽,而且隐身效果良好。

舰船整形技术是利用金属平板散射电磁波的原理将入射的雷达波向一些无危险(或威胁)方向散射。对于舰船而言,主船体和上层建筑是舰 RCS 的主要贡献部分,因此通常采用一些平直金属板来构造这些部位,并倾斜布置以控制反射波的方向。然而在舰船总体设计阶段中,整形设计通常要考虑和兼顾与舱室容积的关系。倾角过大,虽可减小舰船的 RCS,但同时也减小了舱室的容积而影响舱内设备的布置,反之亦然。以前通常是采用经验法来解决这个问题,例如文献[2]中给出了当频率为 9.1 GHz,金属平板倾斜角为 3°、5°、7°和 10°时与 RCS 减少的关系。此关系虽可用于设计中,

收稿日期:2008-11-03

基金项目:十一五预研支撑项目(6220100302)

作者简介:宋东安(1958-),男,研究员。研究方向:电磁兼容设计、分析与实验研究。E-mail:EMCeditor@126.com

但有局限性,当频率或倾斜角改变时将不再适用。事实上,金属板的 RCS 不仅与雷达波的入射角、频率相关而且还与它的几何尺寸相关。本文将采用物理光学法对金属板的 RCS 进行理论分析,讨论了在不同的频率和不同的几何尺寸下,金属平板的 RCS 与倾斜角的关系。所得出的结论可以用于舰船雷达隐身设计的整形技术之中。

2 面散射基本理论

物理光学法也称为物理光学近似或面电流法^[3-6]。该方法在分析面散射问题时是基于 Stratton-Chu 积分方程^[7,8],为了使该方程便于计算做了 2 个基本假定,其一在目标被照射面的每点局部电流密度和在一无限大相切平面上该点流过的电流密度相同;其二,目标任一部位的几何阴影在该阴影部位上产生电流为零,这就是说当电磁波正面照射金属板时,其背面将不产生电流。虽然这两种假设具有一定的局限性,但当散射方向偏离镜面反射方向不远时,该方法可给出令人满意的预测结果。在上述 2 个基本假设下,物理光学法给出的 RCS 计算公式为^[9]:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int (\hat{r} \cdot \hat{n}) e^{j2k\hat{r} \cdot \hat{r}'} ds' \right|^2 \quad (1)$$

式中 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ 为波长; \hat{n} 为散射面的法向单位矢量; \hat{r}' 为散射面上坐标矢量; \hat{r} 为散射面上的点指向场点的单位矢量,式中的积分是对整个散射面进行。式(1)适用于目标的单站或后面散射计算。然而在舰船整形设计时,我们不仅要知道平板的单站 RCS,而且希望了解其在任意方向上的 RCS,特别是希望知道在入射角附近处的 RCS 变化,这有利于我们设计平板的倾角。

由电磁场理论可知,当散射面上的电流分布为 $\vec{J}(\hat{r}')$ 时,其散射场的磁场分量 \vec{H}' 可由下式求得:

$$\vec{H}' = \nabla \times \int \vec{J}(\hat{r}') \psi ds' \quad (2)$$

式中 ψ 为自由空间格林函数,上式右边的求导与积分无关,因此可移入积分号内:

$$\vec{H}' = \int (\nabla \times \vec{J}(\hat{r}')) \psi ds' \quad (3)$$

利用矢量运算公式求得: $\nabla \times \vec{J}(\hat{r}') \psi = \nabla \psi \times \vec{J}(\hat{r}') + \psi \nabla \times \vec{J}(\hat{r}')$, 由于是空间求导与散射面坐标无关,即 $\nabla \times \vec{J}(\hat{r}') = 0$ 。因此式(3)可化简为:

$$\vec{H}' = \int (\nabla \psi \times \vec{J}(\hat{r}')) ds' \quad (4)$$

在远场近似条件下有:

$$\nabla \psi = -\hat{r} \frac{1}{4\pi r} e^{-jkr} \cdot e^{jk\hat{r} \cdot \hat{r}'} \quad (5)$$

式中 \hat{r} 为散射面上的点到场点的方向矢量,或散射波的方向, r 为散射面中心原点到场点的距离。将上式代入式(4)得:

$$\vec{H}' = \frac{jk}{4\pi r} e^{-jkr} \int [\vec{J}(\hat{r}') \times \hat{r}] e^{jk\hat{r} \cdot \hat{r}'} ds' \quad (6)$$

用磁场定义的 RCS 为^[1]:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{H}'|^2}{|\vec{H}^i|^2} \quad (7)$$

式中 \vec{H}^i 为入射到散射面上的磁场,将式(6)代入式(7)可得:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \left(\frac{k}{4\pi r} \right)^2 \left| \frac{1}{\vec{H}^i} \right|^2 \left| \int [\vec{J}(\hat{r}') \times \hat{r}] e^{jk\hat{r} \cdot \hat{r}'} ds' \right|^2 \quad (8)$$

利用上文第一个假设,上式中的 $\vec{J}(\hat{r}')$ 可以用 \vec{H}^i 来表示:

$$\vec{J}(\hat{r}') = 2\hat{n} \times \vec{H}^i \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)并进行简化可得:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \frac{1}{\vec{H}^i} \right|^2 \left| \int [(\hat{n} \times \vec{H}^i) \times \hat{r}] e^{jk\hat{r} \cdot \hat{r}'} ds' \right|^2 \quad (10)$$

设 \vec{H}^i 为平面波,其在散射面上可写成以下形式:

$$\vec{H}^i = H^i e^{-jk\hat{r}_i \cdot \hat{r}'} \hat{e}_h \quad (11)$$

式中 H^i 为入射磁场的模, \hat{e}_h 为入射磁场的方向矢量, \hat{r}_i 为平面波入射的方向矢量,将式(11)代入式(9)可得:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int [(\hat{n} \times \hat{e}_h) \times \hat{r}] e^{jk(\hat{r}-\hat{r}_i) \cdot \hat{r}'} ds' \right|^2 \quad (12)$$

式(12)即为目标在平面波任意入射时,在任意散射方向中的 RCS 计算公式,当我们只考虑目标的后面(或单站)散射时,则有:

$$\hat{r}_i = -\hat{r} \quad (13)$$

$$(\hat{n} \times \hat{e}_h) \times \hat{r} = (\hat{r} \cdot \hat{n}) \hat{e}_h - (\hat{r} \cdot \hat{e}_h) \hat{n} = (\hat{r} \cdot \hat{n}) \hat{e}_h \quad (14)$$

在后面散射时, \hat{e}_h 垂直于 \hat{r} , 则 $\hat{r} \cdot \hat{e}_h = 0$ 。将以上两式代入式(12)就可得到式(1)。须说明,我们在推导式(12)时,假设入射波为平面波。实际上式(12)也适用于非平面波情况(例如球面波和柱面波),只要波源离散面足够远,使得其在散射面上产生的相位差与平面波相比小于 $\frac{\pi}{8}$ 。对整个舰船而言,不能将入射的雷达波近似为平面波,这是因

为雷达波具有聚焦作用,不能将其视为点源。但是我们在分析某个部位的散射特性时,当该部位的几何尺寸不是太大时,采用平面波近似将不会产生较大的误差。因此我们可以在舰船 RCS 整形设计中采用式(12)进行理论分析。

3 分析与讨论

现代隐身舰船外形的特点是用若干个平直金属板构成,特别是上层建筑、桅杆和烟囱更是如此。设计者通过调整这些金属板的倾斜角来减小小舰船在有威胁方向上的 RCS。关于平板的散射特性已做了许多理论和实验上的研究工作^[10,11],但将这些研究成果用于舰船整形设计时还要做一些研究工作。下面我们运用式(12)来分板平板的 RCS 随倾斜角的变化关系。如图 1 所示,金属板与垂直面的夹角(或倾斜角)为 α 。在图中建立了两个坐标系,一个是 $x'y'$ 平面坐标系,坐标原点在金属板的几何中心, y' 轴指向纸内;另一个是 xyz 立体坐标系;其原点、 x 轴和 y 轴与 $x'y'$ 坐标系重合, z 轴垂直金属板并且 xyz 3 轴方向满足右手螺旋定则。金属的长度在 x 方向为 a ;在 y 方向为 b (图中没有注明)。下面我们利用图 1 中的坐标系对式(12)中的积分核进行简化运算:

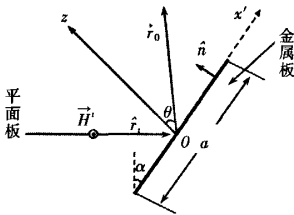


图 1 平面波入射金属板示意图

$$(\hat{n} \times \hat{e}_h) \times \hat{r} = (\hat{r} \cdot \hat{n}) \hat{e}_h - (\hat{r} \cdot \hat{e}_h) \hat{n} \quad (15)$$

由于一般的雷达波为垂直极化,因此我们可假设入射平面波的磁场方向垂直纸面指向外部($\hat{e}_h // \hat{y}$),并且平面波的方向 \hat{r}_i 平行于 xz 平面,这样其反射波的方向也基本平行于 xz 平面。因此可认为 $(\hat{r} \cdot \hat{e}_h) \approx 0$;另外,当场点很远时, $\hat{r} \approx \hat{r}_0$ (\hat{r}_0 为原点 O 指向场点的单位矢量,用 \hat{r}_0 表示相应的距离矢量), \hat{r}_0 与 z 轴的夹角为 θ ,因此 $(\hat{r} \cdot \hat{n}) \approx (\hat{r}_0 \cdot \hat{n}) = \cos\theta$ 。这样式(15)简化为:

$$(\hat{n} \times \hat{e}_h) \times \hat{r} \approx \hat{e}_h \cos\theta \quad (16)$$

式(12)中的相位项由两部分组成, $jk\hat{r} \cdot \mathbf{r}'$ 表示平板上各点的散射相位; $-jk\hat{r}_i \cdot \mathbf{r}'$ 表示平板上各点

处的入射波相位。在球坐标系中,前者可以写为:

$$jk\hat{r} \cdot \mathbf{r}' = jk(x'\sin\theta\cos\varphi + y'\sin\theta\sin\varphi) \quad (17)$$

式中的 θ 和 φ 为球坐标系中的角坐标。由图 1 可知平面波的入射方向 \hat{r}_i 与 z 轴的夹角为 α ,则:

$$jk\hat{r}_i \cdot \mathbf{r}' = jkx'\sin\alpha \quad (18)$$

上式表明由于斜入射,使平板上的电流相位在 x' 方向按线性律变化,但其幅值可认为是均匀分布。将式(16)~式(18)代入式(12)得:

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \iint \hat{e}_h \cos\theta \exp[jk(y'\sin\theta\sin\varphi + x'\sin\theta\cos\varphi - x'\sin\alpha)] ds' \right|^2 \quad (19)$$

对式(19)进行积分运算得:

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \cos^2\theta \frac{\sin^2 u}{u^2} \cdot \frac{\sin^2 v}{v^2} \quad (20)$$

$$u = \frac{\pi b}{\lambda} \sin\theta\cos\varphi \quad (21)$$

$$v = \frac{\pi a}{\lambda} (\sin\theta\cos\varphi - \sin\alpha) \quad (22)$$

在舰船整形设计时,我们主要关心平板在俯仰面(或图 1 所示的 $x'z$ 平面)内的散射特性,因此可令 $\varphi=0$,式(20)可简化为:

$$\sigma = \frac{4\pi a^2 b^2}{\lambda^2} \cos^2\theta \left[\frac{\sin \frac{\pi a}{\lambda} (\sin\theta - \sin\alpha)}{\frac{\pi a}{\lambda} (\sin\theta - \sin\alpha)} \right]^2 \quad (23)$$

上式表明,金属的散射特性与入射角、波长以及金属板的几何尺寸相关。式(23)与平板单站的 RCS 具有相同的函数形式,只是最大散射方向不在 Z 方向,而是偏离了一个角度。利用最大辐射条件可求出这个角度。令 $\sin\theta - \sin\alpha = 0$;则 $\sin\theta = \sin\alpha$, $\alpha = \theta$,这正是几何光学的结论,即反射角等于入射角。这说明利用平板的倾斜布置,可以将入射的主要电磁能量向无威胁方向反射。但还是有少量的电磁能量沿入射方向相反的方向($-\hat{r}_i$)散射。在舰船整形设计中要尽量减小这个方向上的散射,下面我们将讨论这个问题。

设当倾斜角为 α_n 时,沿 $-\hat{r}_i$ 方向的散射最小,则令:

$$\sin \frac{\pi a}{\lambda} (\sin\theta - \sin\alpha_n) = 0 \quad (24)$$

或

$$\frac{\pi a}{\lambda} (\sin\theta - \sin\alpha_n) = n\pi \quad (25)$$

式中 n 取不等于零的整数。由式(12)可知 $\alpha_n = -\theta$,代入上式可得:

$$\sin\alpha_n = \frac{n\lambda}{2a} \quad (26)$$

上式右边的“-”号已被略去。 n 的含义是对应着散射方向图的第 n 个零点。同理我们也可求出在 $-\hat{r}_i$ 方向产生旁瓣散射最大时的倾角 α_m , 此时令:

$$\sin \frac{\pi a}{\lambda} (\sin \theta - \sin \alpha_m) = 1 \quad (27)$$

可求得:

$$\sin \alpha_m = \frac{(2m+1)\lambda}{2a} \quad (28)$$

式中 m 取非零正整数, 其含义是对应着散射方向图第 m 个旁瓣。式(26)和式(28)是我们设计平板倾角的理论依据。显然, 当 α_n 向 α_m 变化时, 平板沿 $-\hat{r}_i$ 方向的散射则由小到大或反之, 因此平板倾斜角设计的基本原则是应尽量接近 α_n 或远离 α_m 。需说明式(26)或(28)在用于单频或存在倍数关系的多个频点的隐身设计时可以获得非常好的效果。如果在一个宽且连续的频段上设计舰船的雷达隐身, 将不可避免地出现满足式(28)的频点。这时我们要分析旁瓣散射大小与 m 的变化关系。由式(23)可以证明, 第 m 个旁瓣最大散射的 σ_m 可按下式计算:

$$\sigma_m = \frac{0.4\sigma_0}{(2m+1)^2} \quad (29)$$

式中 σ_0 为平板的散射最大值(即主瓣散射)。对上式进行归一化并取对数可得:

$$\sigma_m = -4 - 20 \log(2m+1) \quad (30)$$

以上两式表明, σ_m 随 m 的增大而减小。但在舰船整形设计时, m 的值不能取得太大, 否则对应的 α_n 会太大, 这样会减小相关舱室的可利用空间。另外, 从表 1 可看出, 当 m 很大时, σ_m (dB) 减小的量值显著变小, 基于这两点原因, 在具体设计时, m 的值不易取得太大或太小, 应采取折衷的方法选取。下面将举例说明在舰船整形设计时, 如何采用式(26)、(28)和(30)进行分析。

表 1 σ_m 与 m 的变化关系表

m	1	2	3	4	5	6	7	8
σ_m (dB)	-13.5	-18	-21	-23	-24.8	-26.3	-27.5	-28.6

在某舰上层建筑弦侧边一块宽度为 $a=1\ 000$ mm 的平板整形设计中, 需确定该平板的倾斜角。所考虑的隐身频段 ≥ 2 GHz (即 $\lambda \leq 150$ mm), 要求 σ_m (dB) < -20 dB, 由表 1 可知取 $m=3$, $\lambda=150$ mm。将上述数据代入式(28)可求得, $\alpha_{m=3}=31.7^\circ$; 代入式(26)可求得 $\alpha_{n=3}=13^\circ$ 。按上述原则, 该平板的倾斜角为 13° , 如果该倾斜角能满足相应舱

室空间的要求即可。否则取 $m=2$ 进行再一次分析计算, 这时只能要求 $\sigma_m < -18$ dB。另外, 改变平板的宽度 a 也会影响倾斜角的设计。以上我们分析了频率低端的 RCS。可以证明, 一旦频率低端的整形设计满足要求, 那么当频率升高时则一定满足要求。

4 结论

本文基于面散射基本原理, 对舰船 RCS 整形设计中如何合理选取平板的倾斜角进行了理论分析和讨论, 指出在单频或存在倍数关系的多频点上进行雷达隐身设计时, 采用本文给出的式(26)或式(28)可给出平板的最佳倾斜角。但是, 实际上舰船的雷达隐身设计通常要考虑一个宽且连续的频段, 这时可采用本文的结论进行合理的折衷设计。最后, 通过一个简单的例子说明了在舰船整形设计时, 如何采用本文给出的相应公式进行折衷设计和理论分析。本文给出的结论对舰船雷达隐身设计具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 朱英富, 张国良编著. 舰船隐身技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2003.
- [2] 克拉特 E F. 雷达散射截面——预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮, 译. 北京: 电子工业出版社, 1988.
- [3] 吴楠, 温定娥. 运用高频方法计算舰艇 RCS[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(2): 77-80.
- [4] 徐云学, 龚书喜. 基于 MATLAB 的电大尺寸目标 RCS 计算系统研究[J]. 电波科学学报, 2007, 22(2): 266-270, 291.
- [5] 刘战合, 黄沛霖, 高旭, 等. 电大尺寸散射体的 RCS 计算方法研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(1): 21-24.
- [6] 伍光新, 邓维波, 姜维, 等. 高频段飞机目标 RCS 分析[J]. 电波科学学报, 2008, 23(3): 545-549.
- [7] 龚中麟, 徐承和. 近代电磁理论[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990.
- [8] GORDON W B. High frequency approximations to the physical optics scattering integral [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1994, 42(3): 427-432.
- [9] STUTZMAN W L, THIELE G A. Antenna Theory and Design[M]. John Wiley & Sons, Inc, 1998.
- [10] SKOLNIK M I 主编. 雷达手册[M]. 谢卓, 译. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [11] 张浩斌, 马凯学, 郭陈江, 等. 任意多边形导体板的高频散射分析[J]. 电波科学学报, 2003, 18(1): 53-56.

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

更多培训课程:

- **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>